

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Я.В. Загуменного

“Задачі керування структурою нестационарних течій та інтегральними характеристиками обтічних тіл”, яку подано на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.05 – Механіка рідини, газу та плазми

Актуальність наукового дослідження та його зв'язок з науковими програмами, планами і темами.

Актуальність дисертаційної роботи, присвяченої дослідженню процесів виникнення і розвитку вихрових утворень у примежовому шарі та супутньому сліді за обтічними тілами, а також розробці методів керування цими процесами для зменшення опору тертя і тиску, не викликає сумніву в зв'язку з важливістю фундаментальної проблеми опору течій в примежовому шарі при турбулентному переході та керуванні структурою течій в при обтіканні тіл. В свою чергу, результати вирішення цих фундаментальних проблем мають бути використані в конструкторських розробках методів управління потоком, які значно знизять енергозатрати при руху суден та літальних апаратів, а також покращать гідравлічні характеристики різного роду трубопроводів.

Дисертаційна робота виконувалась в Інституті гідромеханіки НАН в рамках наукових програм, бюджетних тем і фундаментальних досліджень: бюджетна тема відділу гідробіоніки та керування примежовим шаром «Керування характеристиками примежового шару та відривом системою розподілених генераторів вихорів» (номер державної реєстрації 0115U002829); спільний науковий проект НАН України – РФФД «Нелінійні поверхневі хвилі у в'язкій неоднорідній рідині» (проект № 18-01-12); науково-дослідна робота «Моделювання керування динамічною структурою хвильових та вихрових полів у пристінних турбулентних течіях при їх взаємодії з обтічною поверхнею, що деформується, шляхом зміни динамічних і геометричних характеристик цієї поверхні» (номер державної реєстрації 0112U000292); бюджетна комплексна тема «Гідродинаміка та тепло-масообмін багатофазних пристінних течій» (номер державної реєстрації 0117U000498).

Основний зміст роботи.

Дисертаційна робота Я. В. Загуменного складається з анотації, вступу, восьми розділів, висновків та списку використаних джерел. У вступі обґрунтована важливість і актуальність дисертаційного дослідження, сформульована мета роботи, її наукова новизна та

практичне значення отриманих результатів. Наводяться дані щодо апробації та структури роботи.

У першому розділі роботи представлені і описані існуючі активні та пасивні методи керування течіями та інтегральними гідродинамічними характеристиками обтічних тіл, а також здійснено аналіз сучасного стану питання. Наведено огляд існуючих методів керування нестационарною структурою течій та інтегральними характеристиками обтічного тіла шляхом генерування його активних коливань або локального деформування поверхні.

У другому розділі детально описані методи чисельного моделювання поставлених задач. Представлено системи диференціальних рівнянь механіки рідини і деформівного твердого тіла з відповідними початковими та граничними умовами. Дано огляд чисельних методів обчислювальної гідромеханіки. Описано обчислювальний пакет OpenFOAM, за допомогою якого проведено моделювання, а також нові програмні коди, що розроблені автором.

У третьому розділі наведено результати дво- і тривимірного чисельного моделювання обтікання плоскої локально деформівної поверхні. Досліджено взаємозв'язок вихрової структури течії в примежовому шарі з гідродинамічними характеристиками обтічної поверхні з локальним джерелом збурення у формі біжучої хвилі заданої амплітуди, частоти і фазової швидкості.

Четвертий розділ присвячено зв'язаним задачам механіки в'язкої нестисливої рідини і в'язкопружного твердого тіла у повній лагранжевій постановці. Зокрема, представлено результати розробки методів керування відривними течіями за рахунок здійснення активних обертально-коливних рухів крила у потоці в'язкої нестисливої рідини.

У п'ятому розділі представлені результати моделювання обтікання крилового профілю NACA0021 із пасивно гнучким хвостовиком, що моделюється в'язкопружним матеріалом, і досліджено особливості його нестационарної поведінки в залежності від довжини, пружних властивостей матеріалу хвостовика і параметрів коливання активно рухомої частини профілю.

У шостому розділі побудований метод чисельного моделювання стратифікованих течій в наближенні Бусінеска з використанням модифікованого пакету OpenFOAM та статичних та динамічних розрахункових сіток. Представлено асимптотичні розв'язки стаціонарних і нестационарних задач формування течій, індукованих дифузіїю на похилій непроникній площині, а також точний розв'язок лінеаризованої задачі генерації полів внутрішніх хвиль ковзанням полоси вздовж похилої площини.

Сьомий розділ присвячений дослідженню нестационарних процесів формування і розвитку течій неперервно стратифікованої й однорідної рідин навколо непроникних

перешкод, зокрема, похилої пластини, циліндру, диску та клиновидного тіла, що можуть бути як нерухомими, так і рухатися рівномірно й прямолінійно з малими швидкостями. Розраховані поля стратифікованих течій навколо рухомих перешкод у надповільному, повзучому та хвильовому режимах узгоджуються з відповідними картинами тіньової візуалізації у лабораторних дослідах, а також з результатами аналітичних розв'язків в рамках єдиної математичної постановки.

У восьмому розділі представлено результати розрахунків стратифікованих течій навколо похилої пластини в режимі генерації супутніх вихрових структур. Досліджено структурні особливості і динаміку нестационарних течій сильно та слабо стратифікованих, а також потенційно та актуально однорідних рідин навколо горизонтальної пластини при зміні її геометричних параметрів.

У висновках сформульовані основні наукові та практичні результати роботи.

Наукова новизна положень дисертаційної роботи.

Відповідно до мети роботи, яку можна сформулювати як «розробка методів керування процесами виникнення і розвитку вихрових утворень у примежовому шарі та супутньому сліді за обтічними тілами, процесів взаємодії різномасштабних структур і їх впливу на локальні та інтегральні гідродинамічні характеристики обтічних тіл в залежності від чисел Рейнольдса і Фруда з метою зменшення опору тертя і тиску», отримано такі важливі наукові результати:

- На основі прямого чисельного моделювання тривимірних нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса та рівнянь руху в'язкопружного середовища з використанням методів динамічних розрахункових сіток в рамках метода скінченного об'єму на базі оригінальних програмних кодів власної розробки та відкритого пакету OpenFOAM розроблено інструмент для дослідження обтікання жорсткого крилового профілю з в'язкопружним хвостовиком.
- За результатами чисельних досліджень встановлено, що з метою затягування переходу в розвинений турбулентний режим течії в примежовому шарі та досягнення інтегрального ефекту зниження опору тертя, параметри збурення у формі біжучої хвилі на обтічній поверхні повинні бути близькими до відповідних параметрів хвилі нестійкості Толлміна-Шлихтинга. В цьому випадку довжину зони переходу можна подовжити у кілька разів відповідно до довжини зони збурювання.
- Дослідження обтікання жорсткого крилового профілю з в'язкопружним хвостовиком, показали, що наявність додаткового гнучкого хвостового елемента, що здійснює активні коливання у протифазі до загального закону руху крилового профілю,

зменшує інтенсивність завихореності супутнього сліду приблизно у 1.5 рази, звужує ширину збуреної течії та підсилює пропульсивний ефект крила майже на 40%, тоді як деформування самого хвостовика визначається його локальною взаємодією з ланцюгами дискретних вихрових елементів, що формуються на профілі і дрейфують вниз за потоком вздовж його поверхні.

- На основі модифікованих автором алгоритмів пакету OpenFOAM для розрахунку нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса для стратифікованих течій в наближенні Бусінеска досліджено структуру потоків навколо перешкод різної форми у широкому діапазоні чисел Рейнольдса і Фруда та побудовано відповідну класифікацію течій. Цікаво, що у випадку надповільних течій на клиноподібному тілі виникає пропульсивна сила, що ініціює саморух клину в сторону його гострої вершини.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, сформульованих у дисертації.

Обґрунтованість наукових положень, сформульованих у дисертації Я. В. Загуменного, визначається коректною постановкою проблеми дослідження, детальним описом завдань та підходів до їхнього вирішення. В роботі використовуються відомі чисельні методи розв'язання диференціальних рівнянь динаміки рідини, які є основою математичних моделей, що забезпечує високу якість отриманих результатів.

Достовірність приведених у роботі розрахунків, на основі яких формуються наукові результати роботи, підтверджується узгодженістю результатів моделювання з аналітичними розв'язками задач, даними лабораторних експериментів. Усі основні результати роботи пройшли широку апробацію шляхом їхньої публікації в різних періодичних фахових виданнях, значна частина з яких представлена в міжнародних базах даних SCOPUS та Web of Science, і представлені на багатьох наукових конференціях в Україні та за її межами.

Практична значимість результатів роботи.

Основним практичним результатом роботи є створення нових програмних комплексів для дослідження нестационарних процесів виникнення і розвитку різномасштабних утворень навколо рухомих або нерухомих перешкод, та оцінки впливу зовнішніх динамічних факторів та неоднорідності середовища на структуру і динаміку течій. Запропоновані підходи керування течіями та відповідні практичні рекомендації можуть бути використані при проектуванні транспортних засобів з метою зниження опору і рівня

пульсацій тиску в авіа- та кораблебудуванні, а також конструюванні магістральних газо-, нафто- та водопроводів.

Повнота викладу отриманих результатів у наукових виданнях.

Отримані результати повністю викладені у 33 наукових працях автора, з яких

- 20 статей у міжнародних наукових журналах, включених до наукометричних баз Scopus і Web of Science
- 13 статей у наукових фахових виданнях ДАК України (дві з них одноосібні)
- 85 робіт у збірниках праць і тез наукових конференцій.

Оформлення дисертації та автореферату.

Дисертація і автореферат оформлені згідно з діючими правилами і рекомендаціями. Автореферат з необхідною повнотою відображає зміст дисертації.

Зауваження по дисертації та автореферату.

- 1) Не надто чітко виписана мета роботи: «вивчення умов виникнення і розвитку вихрових утворень у примежовому шарі та супутньому сліді за обтічними тілами, взаємодії різномасштабних структур і їх вплив на локальні та інтегральні гідродинамічні характеристики обтічних тіл в залежності від чисел Рейнольдса і Фруда. Розробка методів керування цими процесами для зменшення опору тертя і тиску». Метою роботи не може бути вивчення, метою можуть бути результати дослідження. Пропоную дещо скориговане визначення мети: «Розробка методів керування процесами виникнення і розвитку вихрових утворень у примежовому шарі та супутньому сліді за обтічними тілами, процесів взаємодії різномасштабних структур і їх впливу на локальні та інтегральні гідродинамічні характеристики обтічних тіл в залежності від чисел Рейнольдса і Фруда з метою зменшення опору тертя і тиску».
- 2) Також не надто чітко викладена методологія чисельного дослідження в розділі 2. Не завжди зрозуміло які саме використані солвери та процедури належать автору, а які – пакету OpenFOAM (стор. 134)
- 3) В розділі 2.5 не наведено чисельні параметри розрахунків, не відображено збіжність сіткового рішення, не обговорюються критерії вибору часового кроку і т.д.
- 4) Подібні зауваження необхідно зробити і до розділів 4-8, в яких вирішуються складні нелінійні задачі, для більшості яких немає аналітичних або наближених рішень. Якими критеріями автор керувався вибираючи той чи інший крок сітки в конкретній

задачі, як контролювалася стійкість рішення, які параметри використовувалися в чисельній схемі TVD? Чи використовувалося розпаралелювання конкретної задачі? Скільки при цьому ядер застосовувалося? Як масштабувалася задача при збільшенні числа ядер і т.д, Всі ці та подібні, на перший погляд, технічні питання, важливі при вирішенні задач обчислювальної гідродинаміки.

- 5) В розділі 7 досліджуються повільні рухи води, викликані слабкою молекулярною дифузією. В недостатній степені висвітлено такі питання: чи оцінювались ефекти чисельної дифузії, яка може бути важлива на великих проміжках часу? Як обирався крок по часу для різних режимів по числу Фруда? Як кількісно можна охарактеризувати «високороздільні та високоточні розрахунки стратифікованих течій»?

Висновок про відповідність дисертації паспорту спеціальності і чинним вимогам.

Вказані вище зауваження не є принциповими і не впливають на загальний позитивний висновок по дисертаційній роботі. Дисертаційна робота Я.В. Загуменного “Задачі керування структурою нестационарних течій та інтегральними характеристиками обтічних тіл” є завершеним дослідженням, в якому розроблено методику керування нестационарною структурою течій та інтегральними характеристиками обтічних тіл на основі нових алгоритмів прямого чисельного розв’язання задач обтікання тіл, що здійснюють нестационарні рухи та виконано розрахунки стратифікованих течій навколо перешкод різної форми в широкому діапазоні чисел Рейнольдса і Фруда. Отримані в роботі нові наукові результати здійснили внесок в гідромеханіку в частині чисельних методів та дослідження процесів керування нестационарною структурою течій. Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 01.02.05 – Механіка рідини, газу та плазми, а її автор Я.В. Загуменний заслуговує на присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.05 – Механіка рідини, газу та плазми.

ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ:

доктор фізико-математичних наук, професор
завідувач відділу моделювання морських
та річкових систем

Інституту проблем математичних машин і систем НАН України

В. С. Мадерич

02.10.20

